ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1973

Seria: ELEKTRYKA z. 42 Nr kol. 402

Roman Janiczek
Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów

STEROWANIE EKSPLOATACJĄ ELEKTROWNI PAROWEJ

Streszczenie. Artykuł daje uogólnienia teoretyczne zagadnień eksploatacji elektrowni. Po sprecyzowaniu zadań i warunków eksploatacji elektrowni sformułowano problem zarządzania i omówiono problem sterowania eksploatacją elektrowni parowej.

1. Rola nauki o eksploatacji elektrowni

Elektrownie parowe należą do złożonych obiektów działalności techniczno-ekonomicznej, której skutki mają duże znaczenie dla gospodarki narodowej. W takich przypadkach optymalne wyniki eksploatacji obiektu można osiągnąć tylko przy odpowiednim rozwoju i praktycznym wykorzystaniu teoretycznych podstaw eksploatacji obiektu. Dotychczas teoria eksploatacji elektrowni nie była rozwijana w należytym zakresie, a skutki tego odbijają się na nie w pełni zadowalających wynikach eksploatacji elektrowni krajowych.

Teoria eksploatacji, jako dopiero rozwijająca się dziedzina nauki, wykorzystuje osiągnięcia kilku pokrewnych nauk, przy czym szczególne znaczenie mają: prakseologia, czyli nauka o racjonalnym działaniu, cybernetyka, teoria niezawodności i inne metody matematyczne, głównie z zakresu tzw. badań operacyjnych. W artykule położono szczególny nacisk na interpretację cybernetyczną procesu eksploatacji elektrowni.

Następujące właściwości elektrowni wpływają na to, że stworzenie teorii i modeli ich eksploatacji nie jest sprawą łatwą:

1° Występuje duża liczebność i różnorodność wielkości wymagających sterowania, tzn. oddziaływania na nie celem zapewnienia optymalnej realizacji celów eksploatacji elektrowni, np. prowadzenie ruchu bloku 200 MW wymaga ponad 500 źródeł informacji.

2° Warunki pracy urządzeń elektrownianych są bardzo trudne ze względu na obecność wysokich ciśnień i temperatur, duże przepływy czynników, w tym zanieczyszczonych, duże natężenia cieplne powierzchni i objętości urządzeń itp.

3° Występują trudności w zorganizowaniu pełnej diagnozy procesu produkcyjnego, np. dokładnego pomiaru natężenia zużycia pyłu węglowego i oceny stopnia zużycia poszczególnych elementów bloków (np. łopatek turbiny).

4° Funkcje przejścia bloków energetycznych są bardzo złożone, a ich ustalenie wymaga kłopotliwych badań.

5° Występują silne powiązania z otoczeniem (po stronie: paliwa, wody, zanieczyszczenia atmosfery), z systemem elektroenergetycznym lub ciepłowniczym, z zaopatrzeniem w materiały i części zamienne, z zakładami wykonującymi remonty itp.

6° Złożone są właściwości dynamiczne elektrowni, zarówno w krótkich (sekundy), jak i długich okresach czasu (miesiące - zmiana stanu technicznego i sprawności urządzeń).

2. Cele eksploatacji elektrowni

Racjonalna eksploatacja obiektu przez personel jest możliwa tylko przy pełnej znajomości jego zadań. Dotychczas zadania eksploatatorów elektrowni nie były w literaturze krajowej przedstawiane w sposób wyczerpujący, a są one znacznie rozleglejsze niż produkcja energii elektrycznej. Traktując elektrownię jako obiekt gospodarczy względnie odosobniony oraz biorąc pod uwagę warunki i cele działania elektrowni, proponuje się następujące werbalne sformułowanie zadań dla eksploatatorów elektrowni:

1° Zapewnienie wywiązywania się elektrowni z zadań produkcyjnych wyznaczonych jej przez system elektroenergetyczny (lub również ciepłowniczy dla elektrociepłowni).

2° Zapewnienie optymalnej żywotności urządzeń.

3° Utrzymywanie na określonym poziomie dyspozycyjności elektrowni.

4° Osiąganie możliwie najkorzystniejszych wyników ekonomicznych.

5° Ograniczenie do określonego poziomu ujemnego oddziaływania elektrowni na otoczenie i człowieka.

6° Zbieranie i rozpowszechnianie doświadczeń z eksploatacji.

Z zadań tych dwa (1° i 5°) wynikają z silnego powiązania elektrowni z otoczeniem. Realizacja celu 3° i częściowo 2° zależy w większości od czynników zewnętrznych, jak jakość urządzeń, materiałów i usług remontowych obcych brygad, konstrukcyjne przystosowanie urządzeń do remontów itp. Największe pole do popisu ma personel elektrowni w zakresie realizacji celu 4°, chociaż możliwości kształtowania jednostkowych kosztów wytwarzania w elektrowni są również ograniczone czynnikami niezależnymi od eksploatatorów (np. przez wysokość kosztów amortyzacji i akumulacji, przydział paliw).

Należy również zwrócić uwagę, że pomiędzy sformułowanymi wyżej podstawowymi zadaniami eksploatacji elektrowni tkwią określone sprzeczności w tym sensie, że realizacja jednego zadania utrudnia realizację innych. Np. gdy dyspozytor systemu elektroenergetycznego przydzieli danej elektrowni bardzo zmienne zadania produkcyjne, to nieuniknionym skutkiem tego będzie wzrost jednostkowych kosztów paliwa tej elektrowni. Podobnie utrzymanie wysokiej średniej skuteczności odpylania spalin lub wprowadzenie ich odsiarczania odbija się ujemnie na kosztach wytwarzania.

3. Dekompozycja procesu zarządzania elektrownią

W literaturze [3] często nie rozróżnia się znaczenia takich pojęć jak: sterowanie, zarządzanie, kierowanie, regulowanie, a rozróżnienie takie jest w zakresie elektrowni potrzebne ze względu na złożoność zadań sterowniczych. Proponuje się całokształt zagadnień związanych z kierowaniem (sterowaniem) eksploatacją elektrowni nazwać zarządzaniem elektrownią, które obejmuje:

1° planowanie perspektywiczne, np. na nadchodzące pięciolecie, (dot. modernizacji, wycofań, rozbudowy, przystosowania do pracy szczytowej lub do ciepłownictwa itp.);

2° planowanie średniookresowe, od miesiąca do ok. 1,5 roku, (dot. typowych remontów urządzeń, zakupu paliw, wody);

3° planowanie krótkoterminowe, od doby do tygodnia, (dot. planowania ruchu urządzeń, planowania zadań personelu i planowania drobnych zabiegów);

4° sterowanie operatywne użytkowaniem i obsługiwaniem urządzeń;

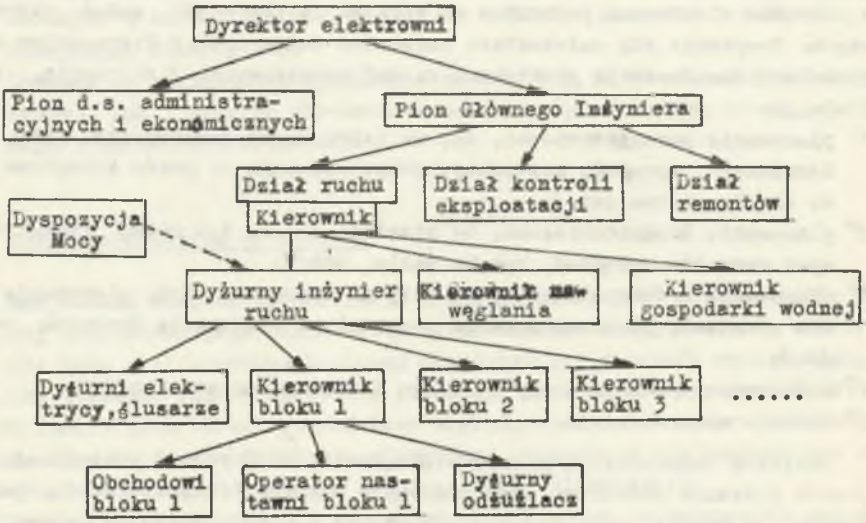
5° funkcje sprawozdawcze.

Powyższą dekompozycję procesu zarządzania elektrownią przeprowadzono z punktu widzenia przebiegu tego procesu w czasie. Niemniej istotna jest dekompozycja procesu zarządzania elektrownią z punktu widzenia organizacji tego procesu.

Racjonalna eksploatacja urządzeń elektrowni, podobnie jak każdego urządzenia technicznego, zmusza do stałego krążenia ich w dwóch podsystemach: użytkowania i obsługiwania [1]. W podsystemie użytkowania urządzenia mogą się znajdować w stanie pracy, rezerwy planowej lub w stanie przejściowym. W podsystemie obsługiwania urządzenia mogą się znaleźć z powodu planowego odstawienia do remontu lub losowego wyłączenia awaryjnego. System eksploatacji tak złożonych obiektów jak elektrownia powinien ponadto zawierać podsystem kontroli eksploatacji. Logiczne jest ograniczenie działalności wymienionych trzech podsystemów do zagadnień techniczno-ekonomicznych ściśle wiążących się z nazwą podsystemów, a wówczas niezbędne jest stworzenie czwartego podsystemu - administracyjnego. Te cztery podsystemy systemu eksploatacji elektrowni powinny realizować jeden wspólny cel - zapewnić możliwie optymalną eksploatację elektrowni.

W świetle powyższego logiczny jest podział systemu zarządzania eksploatacją elektrowni na podsystemy użytkowania, obsługiwania, kontroli i administracji. Trzy pierwsze związane są bezpośrednio z eksploatacją urządzeń i dlatego w praktyce są podporządkowane jednemu kierownikowi (główny inżynier elektrowni), a podsystemem administracyjnym kieruje dyrektor ds. administracyjnych. Za prawidłową realizację wymienionych głównych celów eksploatacji elektrowni odpowiedzialny jest jednoosobowo dyrektor elektrowni. Każdy z podsystemów jest również zorganizowany w sposób hierarchicz-

ny, co na rys. 1 przedstawiono na przykładzie Działu Ruchu. Na rysunku tym zaznaczono również operatywne podporządkowanie Dyżurnego Inżyniera Ruchu elektrowni Dyspozytorowi Mocy systemu elektroenergetycznego.



Rys. 1. Fragment schematu hierarchicznej organizacji eksploatacji elektrowni

W dalszym ciągu artykułu pominięto zagadnienia optymalizacji planów eksploatacji elektrowni (strategii eksploatacji) na korzyść szerszego potraktowania znacznie mniej rozeznanych teoretycznie zagadnień operatywnego sterowania pracą elektrowni. Omówiono więc zadania realizowane przez Dział Ruchu elektrowni w zakresie użytkowania urządzeń i przez Dział Remontów w zakresie obsługiwania urządzeń.

4. Operatywne sterowanie eksploatacją elektrowni

Użytkowanie tak złożonego zgrupowania urządzeń, jakim jest elektrownia, odbywa się w warunkach zmieniających się prawie ciągle pod wpływem czynników wewnętrznych i zewnętrznych. Proces oddziaływania bieżącego na użytkowanie urządzenia w kierunku zapewnienia optymalnej eksploatacji elektrowni nazwano za [3] sterowaniem operatywnym eksploatacją elektrowni. W interpretacji cybernetycznej system sterowania tworzą obiekt sterowany, którym w elektrowni są urządzenia i układy pracujące w procesie technologicznym oraz systemem sterujący, który tworzy personel użytkujący urządzenia oraz urządzenia i układy do sterowania. Każdemu z tych elementów systemu

sterowania można przypisać określoną liczbę współrzędnych. Stan obiektu sterowanego można opisać n - wymiarowym wektorem $\vec{X}$, zwanym wektorem stanu

$$\vec{X} = \begin{vmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_n \end{vmatrix}$$

Poszczególne współrzędne X_i są w przypadku elektrowni w większości funkcjami czasu, stopnia obciążenia itp. parametrów, z licznymi ograniczeniami dotyczącymi zakresów i szybkości zmian wartości wielkości X_i.

Wpływ środowiska zewnętrznego (otoczenia) na obiekt sterowania można dla elektrowni przedstawić w postaci wielu funkcji czasu $Z_i(t)$. Obrazują one np. zadawane wykresy obciążenia elektrowni $P(t)$, zmiany w czasie temperatury wody chłodzącej $T_w(t)$ itp. Funkcje te również można potraktować jako składowe wektora oddziaływań zewnętrznych

$$\vec{Z} = \begin{vmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_i \\ \vdots \\ Z_m \end{vmatrix}$$

System operatywnego sterowania winien tak oddziaływać na elektrownię, aby przy danym stanie obiektu ($\vec{X}$) i oddziaływaniach zewnętrznych ($\vec{Z}$) zrealizować cel sterowania. W ujęciu cybernetycznym oddziaływania sterujące przedstawia się również jako składowe wektora sterowania

$$\vec{y} = \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ y_v \end{vmatrix}$$

Przy powyższych założeniach podstawowe zadania sterowania formułuje się następująco: należy znaleźć taki wektor sterowania $\vec{y}$, aby przy znanych ograniczeniach i zmieniających się niezależnie od woli systemu sterującego składowych wektorów $\vec{X}$ i $\vec{Z}$ osiągnąć cel sterowania.

Doraźne cele sterowania operatywnego eksploatacją elektrowni mogą być różne w zależności od sytuacji, w której podejmuje się decyzje. Rozróżnić można następujące sytuacje:

1° - Praca ustalona urządzeń. Wówczas jedynym celem sterowania jest zapewnienie możliwie największej ekonomiczności pracy urządzeń, czyli ekstremalizacja funkcjonału F, zwanego wskaźnikiem celu sterowania

$$\underset{y}{F(\vec{X}, \vec{Z}, \vec{y}, t)} = \text{ekstremum}$$

Wskaźnikiem tym w ujęciu kompleksowym powinien być składnik zmienny jednostkowych kosztów wytwarzania.

2° - Planowe zmiany stanu obiektu (rozruch, odstawienie, zmiana obciążenia). W takiej sytuacji pierwszoplanowym celem sterowania powinna być minimalizacja czasu realizacji zmiany stanu (przy licznych ograniczeniach), a względy zużycia energii odgrywają nieco mniejszą rolę.

3° - Sytuacje awaryjne (wypadnięcie urządzenia potrzeb własnych, zwarcie w rozdzielni itp.). Wówczas jedynym racjonalnym celem sterowania powinno być niedopuszczenie do rozprzestrzeniania się awarii i możliwie szybka likwidacja jej skutków. Koszty tych przedsięwzięć są na ogół pomijalnie małe w stosunku do wartości zagrożonych urządzeń.

4° - Obsługiwanie urządzeń. W najogólniejszym przypadku celem sterowania w procesie obsługiwania urządzeń powinna być minimalizacja czasu realizacji prac remontowych, chociaż koszty z tym związane również odgrywają pewną rolę. W tym zakresie znane są i stosowane praktycznie naukowe metody organizacji i sterowania realizacją złożonych przedsięwzięć, przy wykorzystaniu metod analizy sieci zależności i maszyn cyfrowych [6].

W wyniku rozwiązania tak sformułowanych zadań sterowania operatywnego powinno się otrzymać optymalne algorytmy sterowania, które w przypadku ogólnym można przedstawić w postaci wektorowej:

$$\vec{y}_o(t) = y_o(\vec{X}, \vec{Z}, t).$$

Dynamika poszczególnych sytuacji w sterowaniu operatywnym jest bardzo różna, różne są też wymagania dotyczące szybkości uzyskiwania tych algorytmów. Jedynie w sytuacji 4° na ogół jest mało istotne czy algorytm ten otrzyma się z pół czy godzinnym opóźnieniem. W pozostałych przypadkach użytkowania urządzeń opóźnienie realizacji oddziaływania sterującego na obiekt o każdą sekundę daje określone ujemne skutki, których znaczenie gospodarcze np. w przypadkach awarii może być bardzo duże.

Stosowane są dwa racjonalne rozwiązywania problemu szybkości uzyskiwania algorytmów sterowniczych. Pierwszy, konwencjonalny, polega na przygo-

towywaniu typowych algorytmów postępowania dla najczęściej występujących przypadków (np. w postaci: programów rozruchu po kilku różnych czasach postoju, wykazu sygnałów których pojawienie się powinno pociągnąć za sobą odstawienie bloku). Algorytmy te są ustalone na podstawie specjalistycznych badań empirycznych i analiz ich wyników. Przy tylko takim podejściu zakres obowiązków, jakie przypadałyby na szczupły personel ruchowy (operator + kierownik bloku), byłby nie do przyjęcia przy obecnej koncentracji mocy w 1 bloku. Dlatego od lat obserwuje się systematyczny rozwój zastosowań automatyki w elektrowniach. Obecnie każdy blok wyposaża się w układy automatycznej regulacji parametrów, w automatykę załączania rezerw, blokady technologiczne, a w nowszych blokach wprowadza się sterowanie sekwencyjne. Wszystkie te środki zmniejszają wprawdzie zakres obowiązków personelu ruchowego, ale jego rola i odpowiedzialność jest nadal bardzo poważna. Wymagany wysoki poziom wyszkolenia personelu ruchowego bloków osiąga się przy wykorzystaniu w szkoleniu cybernetycznych modeli bloków, czyli tzw. symulatorów. Za granicą w kilku ośrodkach szkoleniowych symulatory takie są już wykorzystywane z powodzeniem, a w kraju przystąpiono już do projektowania tego ciekawego urządzenia [7].

Drugim, przyszłościowym rozwiązaniem jest zastosowanie maszyn cyfrowych do sterowania elektrownią. Za granicą eksploatuje się już eksperymentalnie kilka bloków bezpośrednio sterowanych cyfrowo, a częściej stosuje się maszyny cyfrowe typu informacyjnego i doradczego. W kraju dopiero rozpoczyna się prace w tym kierunku.

5. Sterowanie sprawnością elektrowni metodą TKE

Przykładem praktycznego zastosowania opisanych powyżej ogólnych zasad sterowania operatywnego eksploatacją elektrowni może być metoda technicznej kontroli eksploatacji (TKE). Metoda ta umożliwia takie sterowanie pracą elektrowni w stanach ustalonych, które zapewnia minimalizację jednostkowego zużycia netto energii chemicznej paliwa, a więc wskaźnika, którego wartość decyduje o jednostkowym koszcie wytwarzania energii elektrycznej.

Metoda ta rozpowszechniana jest obecnie w kraju, na razie dla bloków kondensacyjnych i dla celów sprawozdawczo-kontrolnych [8]. Poniżej przedstawiono koncepcję jej zastosowania do sterowania operatywnego elektrownią. Jednostkowe zużycie energii chemicznej paliwa przez blok w określonej chwili jest złożoną funkcją wielu czynników, $b(\vec{x}, \vec{z}, \vec{y})$, z których część ma charakter parametrów, a część - zmiennych decyzyjnych z punktu widzenia operatora nastawni blokowej. Ponieważ metoda TKE powinna spełniać poza funkcjami sterowniczymi również funkcje kontrolno-sprawozdawcze, więc niezbędne jest uwzględnienie obu grup czynników. Analizując kształtowanie się wskaźnika b w elektrowniach można zauważyć, że nie osiąga on nigdy wartości niższej od ściśle określonej dla danego bloku i warunków

eksploatacji wartości b_o. Tę najniższą z możliwych do osiągnięcia wartość b_o można więc potraktować jako punkt odniesienia, a dokładniej analizować różnicę

$$\Delta b_o(\vec{X}, \vec{Z}, \vec{y}) = b(\vec{X}, \vec{Z}, \vec{y}) - b_o(\vec{X}_o, \vec{Z}_o, \vec{y}_o).$$

O ile dla każdego bloku zostaną jednoznacznie sprecyzowane warunki, dla których określa się b_o, to wówczas b_o = const, a problem minimalizacji b można rozwiązać przez rozwiązanie zadania dualnego:

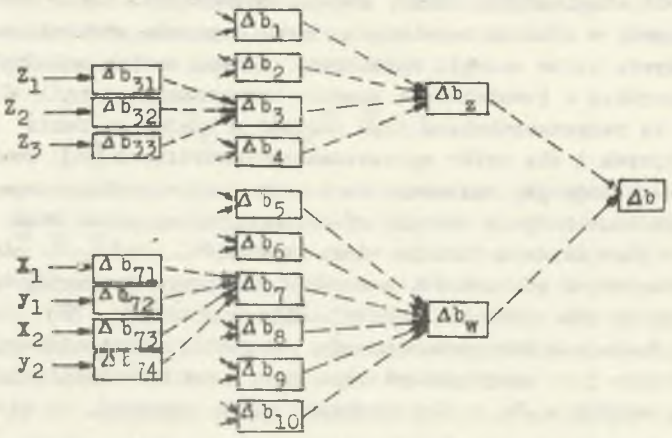
$$\Delta b(\vec{X}, \vec{Z}, \vec{y}) = \min.$$

Odchylenia Δb jednostkowego zużycia energii przez blok od tzw. podstawowej wartości porównawczej b_o można przedstawić jako sumę odchyleń cząstkowych powstających pod wpływem różnych przyczyn

$$\Delta b(\vec{X}, \vec{Z}, \vec{y}) = \sum_{i=1}^{n} \Delta b_i(\vec{X}_i, \vec{Z}_i, \vec{y}_i).$$

W sumie rozróżnia się ok. 40 ważniejszych odchyleń cząstkowych. W oparciu o znane zależności energetyczne i badania empiryczne można sformułować wzory matematyczne, określające poszczególne odchylenia cząstkowe jako funkcje współrzędnych wektorów: stanu $\vec{X}_i$, oddziaływań zewnętrznych $\vec{Z}_i$ i sterowania $\vec{y}_i$.

Znając te wzory można na podstawie pomiaru wartości określonych wielkości obliczyć dowolne odchylenie cząstkowe Δb_i, a następnie ich sumę Δb.



Rys. 2. Schemat powstawania odchyleń Δb

Zastosowanie maszyn cyfrowej do tych obliczeń pozwala na ich realizację w czasie poniżej 3s, co umożliwia operatorowi bloku na oddziaływanie na obiekt z niewielkim opóźnieniem. Dodatkowe korzyści wynikają z podziału odchyleń na dwie grupy: powstające pod wpływem czynników zewnętrznych Δb_z, na które personel elektrowni nię ma wpływu i wewnętrznych Δb_w, o których poziomie decydują oddziaływania sterujące operatora. Odchylenia wewnętrzne mogą być obliczane częściej i dokładniej niż zewnętrzne,które mogą być tylko rejestrowane dla celów statystycznych. Zastosowanie zamiast maszyny cyfrowej typu informacyjnego maszyny do sterowania procesami przemysłowymi umożliwi automatyczne sterowanie sprawnością bloku przy wykorzystaniu metody TKE.

Dotychczas w elektrowniach krajowych metoda TKE znalazła zastosowanie głównie dla celów kontrolnych i sprawozdawczych, a wyniki ręcznie wykonywanych obliczeń znane są z miesięcznym opóźnieniem, co ogranicza ich wykorzystanie do oceny poziomu eksploatacji bloku, oceny skutków remontów, modernizacji itp. Obecnie trwają w kraju prace nad opracowaniem cyfrowego rejestratora wartości wielkości niezbędnych przy stosowaniu metody TKE oraz opracowuje się programy obliczeń metodą TKE na minikomputery, które będą instalowane w kilku węzłach wytwórczych systemu elektroenergetycznego. Prace te dotyczą jednak nadal zastosowań metody TKE dla celów sprawozdawczych i kontrolnych. Wynika to stąd, że prace nad automatyzacją procesu sterowania elektrownią są w kraju słabiej rozwinięte niż w zakresie systemu elektroenergetycznego.

LITERATURA

1. J. Konieczny, E. Olearczuk, W. Żelazowski: Elementy nauki o eksploatacji. WNT, Warszawa 1969.
2. A.I. Gutsztejn: Zarządzenie przedsiębiorstwem przemysłowym a cybernetyka. PWE, Warszawa 1972.
3. N.E. Kobriński: Podstawy sterowania w systemach ekonomicznych.WNT,Warszawa 1972.
4. T. Kasprzak (red.): Cybernetyka zarządzania w systemach ekonomicznych. PWE, Warszawa 1971.
5. Z. Porębski, K. Jarosławski: Metody analizy drogi krytycznej i ich zastosowanie w przedsiębiorstwie. WNT, Warszawa 1971.
6. R. Janiczek: Zastosowanie metod analizy sieci zależności w gospodarce remontowej elektrowni. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej "Elektryka" nr 37, 1973.
7. A. Matczewski: Problem doboru symulatora do szkolenia obsługi bloków energetycznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej "Elektryka" nr 37, 1973.
8. J. Longchamps, Z. Sobiś: Metoda TKE i jej perspektywy na podstawie dotychczasowych doświadczeń, "Energetyka" nr 4, 1973.
9. R. Janiczek: Cybernetyka eksploatacji elektrowni parowych. Materiały z Sympozjum pt. "Nauka o eksploatacji na usługach systemu elektroenergetycznego", Komitet Elektrotechniki PAN, SEP, ZEOW, Radom, luty 1973

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ПАРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Р е з ю м е

В статье рассматриваются задача и условия эксплуатации паровой электростанции, а также формулируются проблемы оптимального её управления.

OPTIMUM CONTROL OF EXPLOITATION OF THERMAL POWER STATIONS

S u m m a r y

The paper discusses the tasks and work conditions for a steam power station and formulates the problem of optimum control of exploitation of the plant.